

白亜紀/第三紀境界における巨大衝突クレーターの形成と衝突津波発生メカニズムの検証

後藤 和久¹, 田近 英一¹, 多田 隆治¹, 松井 孝典²

1. 海洋域における天体衝突

地球史において、天体衝突は普遍的な現象である。地球表面の約70%は海洋で覆われていることから、衝突の大部分は海洋で起こったはずである。海洋における天体衝突（以下、海洋衝突と呼ぶ）は地球特有の現象であり、その実態解明は地球環境や生命の進化過程を理解する上できわめて重要である。ところが、現在までに地球上で報告されている約170個の衝突クレーターのうち、海洋衝突クレーターはわずかに19個である。これは、海底の衝突クレーターは発見が困難であること、海洋プレートの沈み込みによって大部分がすでに消失していること、海洋衝突クレーターの探査が組織的に行われていないため、北米や北欧など研究が特定地域に偏っていることなどが原因としてあげられる。しかしながら、海洋衝突クレーターの形成過程や地質学的特徴は徐々に明らかになりつつある[1]。

これまでに知られている海洋衝突の中で最も規模が大きいものは、今から約6,500万年前の白亜紀/第三紀（以下 K/T）境界で生じた。この時、恐竜をはじめとする陸上や海洋表層中の動植物の大量絶滅が引き起こされた。K/T 境界では、直径約10kmの地球外天体が衝突したと考えられており、メキシコ・ユカタン半島北部に、直径約180kmの衝突クレーター（チチュルブ・クレーター）が発見されている。このクレーターは、南アフリカのフレデフォート・クレーター、カナダのサドベリー・クレーターと並ぶ、地球上で最大規模の衝突クレーターである。また、衝突年代が比較的新しいため、大きな変形や侵食を受けていない。この衝突

は水深100m程度の浅海域で生じたと考えられており、衝突地点周辺のメキシコ湾やカリブ海沿岸に数多くの津波堆積物が残っていることから（図1a）、衝突に伴って巨大な津波（衝突津波と呼ぶ）が発生した可能性が指摘されている[2-6]。

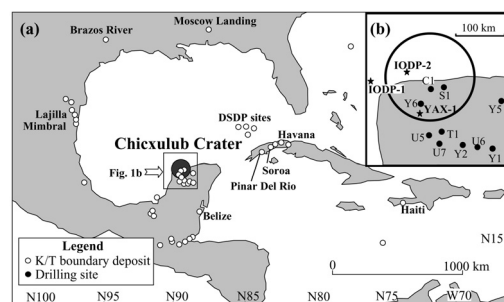


図1：衝突地点周辺における (a) K/T 境界層の分布 (Tada et al. [5]に加筆) と、(b) チチュルブ・クレーター内掘削地点の分析 (Goto et al. [9]に加筆)。図の円は、Morgan et al [15]により推定されたクレーターのリムの位置。Belize のK/T 境界層は陸上で形成されたものであるが、それ以外のK/T 境界層は海底で堆積しており、すべて津波の影響を受けて形成されたと考えられている。掘削サイトのうち、C1, S1, T1, Y1, Y2, Y5, Y6 コアは、メキシコの石油会社によって掘削されたもので、試料の入手は困難である。U5, U6, U7コアは、UNAM によって掘削された。

チチュルブ・クレーターは海洋衝突によるクレーター形成過程や、衝突津波の発生過程と周辺海域への影響を詳しく調べることができるきわめて稀な例である。しかし、衝突が海洋域で生じた結果、クレーターそのものがその後の時代の海底堆積物によって埋め立てられ、現在では地下2~3kmに埋没している。このため、詳細についてはまだ良くわかっていない。また、従来の研究は重力異常探査や地震波探査が中心で、クレーターの詳しい構造や形成過程についても良くわかって

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

2. 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

いない。

このような状況の中、国際陸上科学掘削計画 (ICDP) とメキシコ国立自治大学 (UNAM) は、2001 年末から2002年初頭にかけて、科学目的としては初めてのチチュルブ・クレーターの掘削を行った。現在、世界中の研究グループがこの掘削コア試料の分析を行っており、これによってチチュルブ・クレーターの形成過程が明らかになりつつある[7, 8]。筆者らの研究グループは、日本から唯一この掘削プロジェクトに参加し、衝突直後にチチュルブ・クレーターに海水が流入・流出することによって巨大津波が発生した可能性の地質学的検証を行った[9]。

本論文では、我々のグループが行ったチチュルブ・クレーター内試料の分析結果に基づき、チチュルブ・クレーターの形成過程（特に修正段階）と K/T 境界における衝突津波発生過程について議論する。

2. 海洋衝突の特徴

天体が海洋域に衝突した場合、陸上での衝突とは異なるさまざまな現象が起きる。たとえば、水は岩石と比べて密度が低いため、海水と海底堆積物を合わせた掘削深度は陸上衝突と比べて深くなる[1]。ただし、海水面に接触した時点でクレーター形成が始まり、その分エネルギーが消費されることから、海底面に形成される衝突クレーターは陸上衝突の場合よりも小規模になる[1]。また、衝突地点の水深が衝突天体の直径より十分深ければ、海底面に衝突クレーターが形成されない場合もある[10]。さらに、海洋衝突が起きた場合、巨大津波が発生して、引き波により陸上や大陸棚の堆積物が沖合へと運搬され、津波堆積物として地層中にその痕跡が記録される[2-6]。

衝突クレーターの周辺にはリムが形成されるが、それが海水面より低い場合には、クレーターへ海水が流入することによって、クレーター周辺に堆積していたイジェクタはクレーター内に運ばれて再堆積する。その結果、海洋衝突クレーターの内部には陸上衝突クレー

ターより厚いイジェクタ層が形成される[1]。クレーターのリムが海水面より高い場合でも、リムの脆弱な部分から海水が浸入し、ガリ (gully) と呼ばれる海水の通り道がリムに形成されることがある。また、海水流入によってリムが大規模に侵食されるため、海洋衝突クレーターのリムは陸上クレーターと比べ低いかもしれないことも確認されることが多い[1]。

チチュルブ・クレーターの場合は、衝突天体の直径が衝突地点の水深と比べて圧倒的に大きいので、クレーターサイズに対する影響はほとんどないものと考えられるが、衝突によって巨大津波が発生した証拠が数多く存在する[2-6]。後で述べるように、形成直後にリムが崩壊してクレーター内に海水が流入した可能性が高く、それに伴って巨大津波が発生したと考えられる。

3. チチュルブ・クレーターの研究史

ユカタン半島の地下に衝突クレーターが存在する可能性は、重力異常データに基づいて1981年に Penfield らによって最初に指摘された。その後、Hildebrand ら[11]は、重力異常と地磁気異常データに再び注目し、さらに石油会社による掘削試料を調べた結果、問題の構造が白亜紀末に形成されたこと、衝突起源物質が存在することを明らかにし、この構造が天体衝突クレーターであることを確認した。さらに、クレーター内に堆積している衝突ガラス片の組成が、メキシコやハイチの K/T 境界層で報告されている衝突ガラス片ときわめて類似していること、その $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が $64.98 \pm 0.05 \text{ Ma}$ [12]を示すことなどから、同クレーターは K/T 境界の衝突クレーターとして広く認知されるようになった。

衝突地点は、石灰岩や苦灰岩などの炭酸塩岩と石膏などの硫酸塩岩からなるユカタンプラットフォーム上であり、衝突時には水深が100m程度の浅海域だったと推定されている。地震波探査による研究に基づけば、チチュルブ・クレーターは、直径約40kmの中央丘を持ち、直径約80kmのピーク・リングを、直径約180～

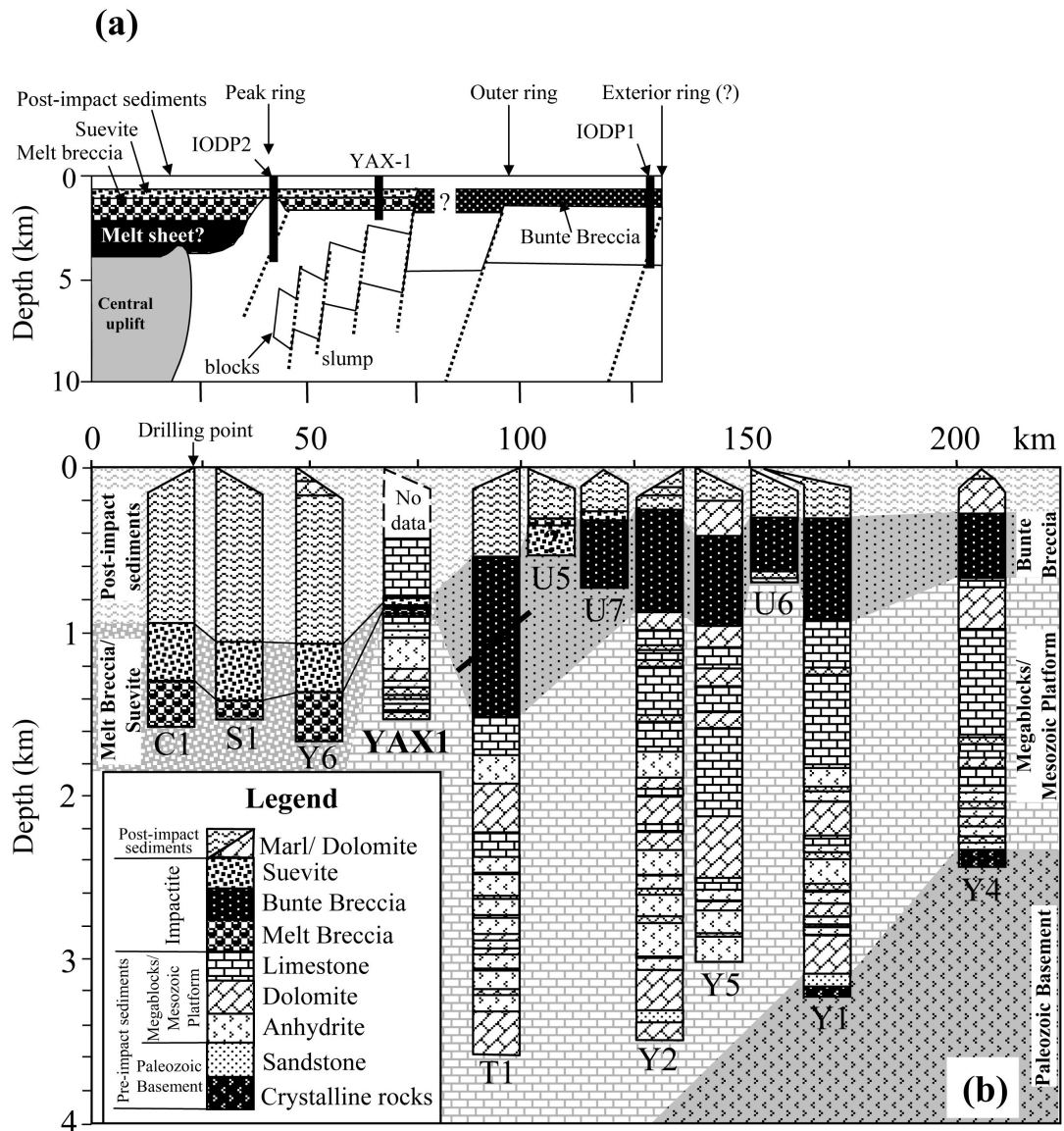


図2：(a) チチュルブ・クレーターの模式断面図 (Morgan ら [13, 15] に基づく)。ピーク・リングの内側では、下位から衝突メルト、衝突メルト角礫岩、スウェーバイトの順で堆積していると考えられている [14, 15]。(b) チチュルブ・クレーター内外の掘削コアの柱状図 (Sharpton ら [14] に加筆)。クレーター外部には、メルトをあまり含まないブンテ角礫岩が堆積している [14]。

200kmのアウトター・リングを持つことなどから、多重リング・クレーターに区分される (図2a) [13]。ピーク・リングの内側には中央盆地が広がっており、その外側にはクレーターリムが内部崩壊したことを示す断層崖と巨大ブロックが複数確認される [13]。

クレーターの直径は、実は未だに決着がついていな

い。Hildebrand ら [11] は、重力異常データをもとに、クレーターの直径を約180kmと推定しているが、Sharpton ら [14] はわずかな重力異常が見られる260～300kmをクレーターの直径と考えている。一方、Morgan ら [15] は、基盤岩の内部崩壊が最も顕著に確認される約195kmをクレーターの直径と考えている。

なお、トランジェントクレーターの直径は、約80~110km程度と推定されている[15]。

Morgan ら[13, 15]の地震波データによれば、中央丘は厚さ2~4kmのメルトシートに覆われている可能性がある。ただし、メルトシートに達する深さまで掘削が行われていないため、その存在は確認されていない。一方、Sharpton ら[14]は、メキシコの石油会社が掘削したクレーター内外のコア試料(図1b)の記載を行い、直径約180kmの範囲には、メルトを基質に多く含む衝突メルト角礫岩 (impact melt breccia) が下部に堆積し、上部にはメルトを破片として多く含むスウェイバイト (suevite) と呼ばれる堆積物が堆積していることを報告した(図2b)。さらに、直径約180kmより外部には、ブンテ角礫岩 (bunte breccia) と呼ばれる、メルト片をあまり含まず、主に衝突クレーターから放出されたイジェクタ (炭酸塩岩や硫酸塩岩のブロック) からなる堆積物が厚く堆積している[14]。Sharpton ら[14]によるクレーター内外の掘削コアの広域記載により、チチュルブ・クレーター内堆積物のおおよその分布は明らかになった。しかし、彼らはわずか数個の試料採取しか行えなかったため、記載の解像度が低く、その詳細はほとんどわかっていない。

今回のICDPとUNAMによるチチュルブ・クレーター掘削プロジェクトは、このような状況を打開し、K/T境界とチチュルブ衝突の同時性の検証、チチュルブ・クレーターの規模の推定、衝突メルト等の衝突起源物質の化学的性質の理解、クレーター形成の物理過程の解明、海洋衝突クレーターにおけるイジェクタの再堆積過程と津波発生メカニズムの理解、などを主目的として計画されたものである。

4. クレーター内部の堆積物の特徴と堆積メカニズム

ICDPとUNAMによる掘削地点は、クレーターの中心からおおよそ60km南方で、掘削コアはYAXCOPOIL-1 (YAX-1) と呼ばれる(図1b)[7]。我々は、UNAMにおいてYAX-1コアの記載を行い、さらに約180個の

コア試料を採取して岩相、粒子・鉱物組成や粒度変化、微化石の分布などを高解像度かつ詳細に調べた。

YAX-1コア中の堆積物は、下位から炭酸塩岩・硫酸塩岩からなる巨大ブロック、衝突メルト角礫岩層、スウェイバイト層、および衝突後に堆積した炭酸塩岩類に区分される(図3)[7, 9]。YAX-1コア中の衝突メ

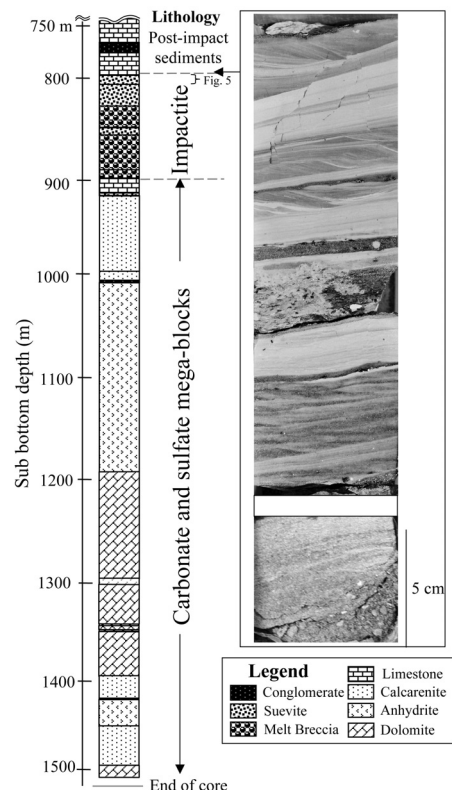


図3：YAX-1コアのインパクトタイト（衝突に関連して形成された堆積層）と巨大ブロック層の模式柱状図、およびスウェイバイト層最上部付近に見られる斜交葉理の写真[9]。上下の地層の主要堆積面に斜交する堆積面を持つ構造が見られ、これは水流による堆積物の移動に伴って形成されたことを示す。

ルト角礫岩層は、淘汰が極めて悪く基質支持（粒子間が基質で埋められており、粒子同士が接していない状態）で、巨礫から細粒砂サイズの変質発泡した衝突メルト片(図4a)や衝撃變成石英(図4b)などの衝突起源物質が混合した状態で堆積している。同層は、衝突によって放出された衝突メルト片などが、クレーター内部に落下して再堆積したものと考えられる[7]。一

方, スウェイバイト層は, 衝突メルト角礫岩層に比べて淘汰が良く粒子支持 (粒子間に基質がほとんど無く, 粒子と粒子が接した状態) で, 主に細礫～細粒砂サイズの緑色変質発泡メルト片や衝撃変成石英などからなり, 基質にはメルト片のほかに炭酸塩岩片や基盤岩片などが多く含まれる。

大変興味深いことに, スウェイバイト層最上部約50 cmには斜交葉理が発達していることが今回の掘削で初めてわかった (図3) [9]. 斜交葉理とは, 上下の地層の主要堆積面に斜交する堆積面を持つ構造で, 水流による堆積物の移動に伴って形成される (最近, 火星においても斜交葉理が発見され, 大きな話題になった). 斜交葉理の存在は, スウェイバイト層堆積時には既に衝突クレーターは海水で満たされていた可能性を強く示唆する [9]. YAX-1コアが採取される以前は, リム

が堤防の役割を果たし, それによって海水は衝突直後に衝突クレーターに流入できなかったとする説が有力であった [1]. YAX-1コア中の斜交葉理は, こうした説を覆し, クレーター形成直後に海水が流入していたことを多くの研究者に納得させるのに十分な証拠となった。

さらに興味深いことに, スウェイバイト層上部約13 mには, 8回以上の粒度と組成の同期的変動が存在することが明らかになった (図5). この変動は, スウェイバイト層が一度に堆積したのではなく, 8回以上の再堆積を繰り返したことを示唆する [9]. 変動の各サイクルの基底部には侵食面が見られないことから, 物質が重力流のように斜面を削りながら流れ下って堆積したのではなく, リム周辺に堆積していたイジェクタが海水流入の繰り返しによって懸濁状態でクレーター

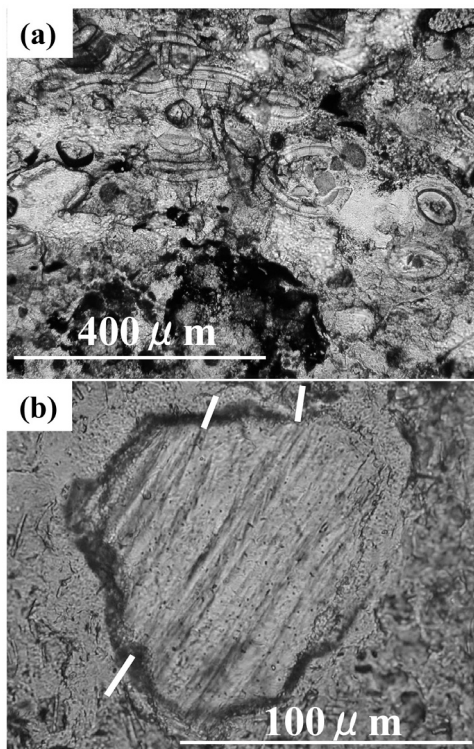


図4：衝突メルト角礫岩層に含まれる, (a) 変質発泡した衝突メルト片, および (b) 三方向のラメラを持つ衝撃変成石英の薄片写真。

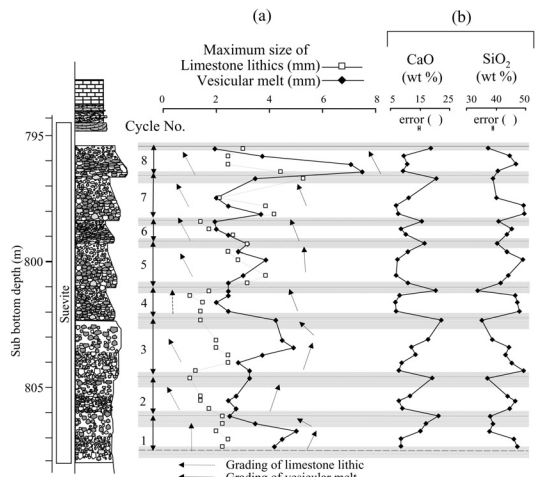


図5：スウェイバイト層上部約13mの部分 (図3参照) の柱状図, および (a) 炭酸塩岩片と衝突メルト片の最大粒径 (mm) と (b) 化学組成変動 (CaO, SiO₂ wt %) [9]. カルシウム含有量とシリカ含有量は逆相関を示すが, カルシウムは主に基質中に含まれ, シリカは主に衝突メルト片に含まれる。従って, 両者の逆相関は, 基質と衝突メルト片の含有量が希釈関係にあることを意味する [9]. これは, 各変動サイクルの基底部付近は衝突メルト片が多く含まれ, 粒子支持な状態になっているのに対し, 上部は基質支持になっているという観察事実と一致し, 海水中で再堆積した堆積物の特徴のひとつである。さらに, この化学組成は粒度と同期的に変化しており, これはスウェイバイト層が一度に堆積したのではなく, 8回の物質流入イベントによって堆積したことを示す [9].

内に繰り返し運搬されたことを反映したものと考えられる[9].

衝突クレーターに海水が流入したことを示す証拠は、他にもある。不思議なことに、スウェーパイトの基質中には衝突による衝撃や高温にさらされた痕跡が見られないナノ化石や浮遊性有孔虫などの微化石が含まれている。これらは衝突直後にクレーターの外部からもたらされたものであると考えられる[9]。さらにその年代を調べた結果、スウェーパイト層下部には衝突当時の海底面付近に堆積していた微化石（およそ71～65 Ma）が多く含まれることが明らかになった。一方、スウェーパイト層上部にはより古い年代の微化石（およそ112～65 Ma）が多く含まれていることがわかり[9, 16]、堆積層の年代が逆転していることが明らかになった[9]。このような堆積層の年代の逆転は、海洋衝突クレーター内部の堆積物の特徴の一つであり[1]、衝突クレーターに海水が流入する際、周囲の海底表面に堆積していた新しい時代の堆積物から順に侵食してクレーター内部にもたらされた結果を反映していると考えられる（図6）[9]。

チチュルブ・クレーターへの海水流入は、クレーターの形状と密接に関係している。なぜなら、浅海域での衝突クレーターに海水が流入するには、全体的または部分的にクレーターのリムが崩壊している必要があるからである。上述のように、白亜紀末の衝突地点周辺の水深は100m程度だったと考えられている。それに対して、チチュルブ・クレーターのトランジェントクレーターリムは、数kmの高さに達した可能性がある[13]。しかし、トランジェントクレーターリムは、一時的には形成されるものの、衝突後数分程度でクレーター内部に崩壊した可能性が指摘されている[13]。実際、地震波探査やYAX-1コアの分析結果からは、リムが内部に崩壊したことを示す白亜紀の巨大ブロックの存在が報告されている[13, 17]。また、現在のチチュルブ・クレーターに高いリムが存在しないことは、地震波探査で確認されている[13, 15]。

以上のことを考えると、チチュルブ・クレーターの

リムは衝突直後にクレーター内部に崩壊し、それに伴って海水流入が生じた可能性が高いと考えられる[9]。

5. K/T 境界における津波発生メカニズム

K/T 境界においては、主に二つのメカニズムで巨大津波が発生したと考えられる[18]。ひとつは、衝突に伴う衝撃波や地震波によってユカタンプラットフォーム

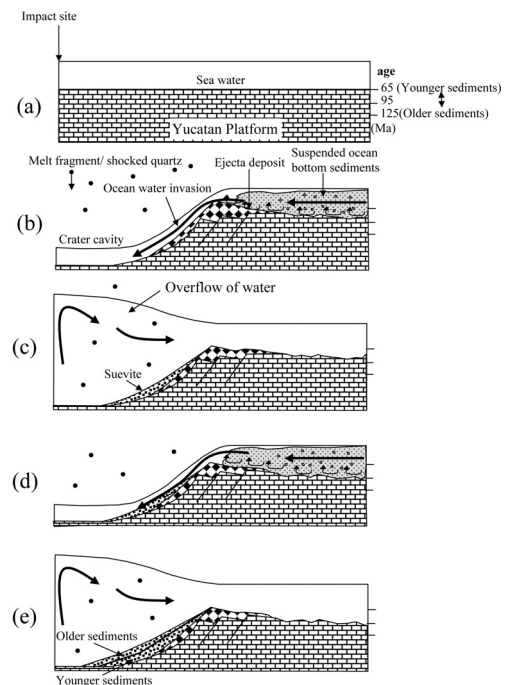


図6：形成直後の衝突クレーターへの海水の流入と流出に伴って発生する津波の概略図（図の簡略化のため、中央丘、ピーク・リング、衝突メルト、衝突メルト角礫岩などは省略）。(a) 衝突前、衝突地点周辺の海底には新しい時代（65Ma）の堆積物から下位に向かって順に古い時代の堆積物が堆積。(b) 衝突クレーターへの海水流入に伴って、海底堆積物が上位から順に削られ、クレーターリム周辺に堆積していたイジェクタとともに衝突クレーター内部に流入して再堆積する（スウェーパイト層の形成）。このとき、衝突地点周辺海域では、衝突クレーターに向かう大規模な引き波が発生する。(c) 衝突クレーターから海水が流出することで、津波が発生。(d) 再び衝突クレーターへ海水が流入する際に、海底堆積物が侵食され、クレーター内部に運搬される。この時、海底表面の新しい時代の堆積物は、すでに第一波によって侵食されて失われているため、より古い時代の堆積物が侵食される。(e) その結果、クレーター内部の堆積物の年代は、上位ほど古くなる。

ムの縁片部が大規模崩壊を起こし、地すべりとして斜面を流れ下る際に発生する津波であり、もうひとつは衝突クレーターへの海水の流入と流出に伴って発生する津波 (図6) である [18, 19]. 海洋衝突では、イジェクタカーテンの前面においても津波が発生する (リム波と呼ばれる) が、遠洋域へ伝播するにつれて急激に分散し、振幅が減衰するため、K/T 境界での衝突の場合、周辺海域に影響を及ぼしうような規模にはならない [18].

YAX-1コアのスウェイバイト層中に斜交葉理が存在すること、基質中の微化石は衝突クレーター外部からもたらされた可能性が高いことは、衝突直後に大規模な海水の流入が起き、それに伴って津波が発生した可能性を支持する [9]. また、スウェイバイト層に見られる8回以上の粒度と組成の同期的変動は、海水の流入と流出が8回以上繰り返した可能性を示唆する [9]. メキシコ湾やカリブ海周辺に分布する K/T 境界津波堆積物中には、流れの方向が反転する斜交葉理の繰り返しが、組成と粒度の同期的変動として、>6~12回の津波の繰り返しが記録されていることが報告されており [3, 4, 5], スウェイバイト層に見られる繰り返しの回数と調和的である [9]. さらに、このメカニズムで津波が発生した場合、衝突地点周辺海域での津波第一波は衝突クレーターに向かう引き波になる [18]. 実際に、我々の研究グループによるキューバ西部における K/T 境界層の調査によれば、津波堆積物基底部付近には、津波第一波が衝突クレーターに向かう引き波から始まったことを示す、北西方向の古流向 (堆積物を構成する物質が、堆積時に水によって運搬された方向) を記録した斜交葉理が見られる [4].

以上のことから、K/T 境界では衝突クレーターへの海水の流入と流出の繰り返しもともなって巨大津波が発生し、衝突地点周辺に分布する K/T 境界津波堆積物を形成したものと考えられる [9].

6. 今後の展望

YAX-1コアの掘削成功により、チチュルブ・クレーターの研究はようやくスタートしたといえる. 最近、UNAM によってクレーター外部の掘削が行なわれ (図1b; U5, U6, U7), さらに統合深海掘削計画 (IODP) もチチュルブ・クレーターの北西側 (メキシコ湾内) の2地点で掘削を計画している (図2a; IODP-1, 2). こうしたコア試料と YAX-1コアの結果を比較することで、チチュルブ・クレーターの形成過程や津波発生メカニズムなどをより強く制約できるようになることが期待される.

一方、K/T 境界において衝突クレーターに海水が流入・流出することで巨大津波が発生した可能性が高いことが本研究によって明らかになった. このメカニズムで津波が発生した場合、衝突クレーターに向かう引き波から始まるため、衝突地点周辺の K/T 境界津波堆積物基底部付近にその痕跡が古流向として記録されている可能性が高い. しかし、キューバ以外の地域では、これまでこの点に注目して詳しく調べられてこなかったため、このような特徴が広域的に確認されるかどうかはまだ良くわかっていない. 今後、特にこの点に注目して、ドミニカ共和国やメキシコ、アメリカなどに分布する K/T 境界津波堆積物の調査を行い、K/T 境界での衝突現象と津波発生メカニズム、および衝突津波が周辺海域に及ぼした影響について詳しく検証していく予定である.

7. 謝辞

本論文の執筆にあたり、匿名の査読者の方に有意義なコメントを数多くいただいた. ここに謝意を表する.

引用文献

- [1] Örmö, J. and M. Lindström, 2000, *Geol. Mag.* 137, 67.
- [2] Bourgeois, J. et al., 1988, *Science* 241, 567.
- [3] Smit, J. 1999, *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.* 27, 75.
- [4] Tada, R. et al., 2002, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 356, 109.
- [5] Tada, R. et al., 2004, *Am. Assoc. Petr. Geol. Mem.* 79, 582.
- [6] Takayama, H. et al., 2000, *Sediment. Geol.* 135, 295.
- [7] Dressler, B. O. et al., 2003, *EOS Transactions* 84, 130.
- [8] Initial results of the CSDP, 2004, *Meteorit. Planet. Sci.* 39, Issues 6 and 7.
- [9] Goto, K. et al., 2004, *Meteorit. Planet. Sci.* 39, 1233.
- [10] Gault, D. E. and C. P. Sonett, 1982, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 190, 69.
- [11] Hildebrand, A. R. et al., 1991, *Geology* 19, 867.
- [12] Swisher, C. C. et al., 1992, *Science* 257, 954.
- [13] Morgan, J. et al., 2000, *Earth Planet. Sci. Lett.* 183, 347.
- [14] Sharpton, V. L. et al., 1996, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 307, 55.
- [15] Morgan, J. et al., 2002, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 356, 39.
- [16] Arz, J. A. et al., 2004, *Meteorit. Planet. Sci.* 39, 1099.
- [17] Wittmann, A. et al., 2004, *Meteorit. Planet. Sci.* 39, 931.
- [18] Matsui, T. et al., 2002, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 356, 69.
- [19] 藤本浩介, 今村文彦, 1997, *海岸工学論文集* 44, 315.